干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近70 a泾河流域径流变化及其驱动因素研究

刘　宇[1,2,3,4]，　管子隆[2,3,4]，　田济扬[1]，　刘荣华[1]，　关荣浩[5]

（1. 中国水利水电科学研究院水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心，北京　100038；2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安　710054；3. 长安大学水利与环境学院，陕西 西安　710054；4. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室，陕西 西安　710054；5. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌　712100）

摘　要：定量评价流域径流变化特征并开展其归因识别研究是应对气候变化实现水资源合理开发利用的基础。本研究以泾河流域为研究区，采用M-K检验、滑动t检验、小波分析等方法分析流域近70 a的水文气象要素变化特征，并基于Budyko假设评价气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明：（1）泾河流域年径流深以0.41 mm·a^{-1}的速率减少，并在1996年发生显著减少突变，相较于突变前减少43.49%。（2）流域年径流深第一、第二和第三主周期分别为41 a、58 a和15 a特征时间尺度。（3）流域径流变化对汛期降水量和潜在蒸发量的变化均较为敏感，流域径流变化对降水量的敏感程度是潜在蒸发量的2.3~5.3倍。（4）人类活动是流域径流变化的主要影响因素，对年、汛期和非汛期径流变化的贡献率分别为90.43%、63.75%和94.08%。研究结果可为区域水资源综合管理与科学调配提供科学依据，并对黄土高原水土流失治理有一定的指导意义。

关 键 词：径流变化；人类活动；气候变化；Budyko假设；泾河流域

文章编号：

流域水文系统受气候变化和人类活动共同作用，一方面，气候要素变化影响着流域的水量补给与排泄，直接或间接的导致流域水文循环过程发生变化[1]；另一方面，人类活动通过改变流域下垫面条件、修建水利设施等，影响着流域水文循环的产汇流机制，改变着水文时空分布和水文循环过程[2]。联合国政府气候变化专门委员会（Intergovernment panelon climate change，IPCC）第五次评估报告显示，在过去的130 a全球平均气温升高了0.85 ℃，在中纬度的大部分地区未来极端降水增大的可能性较大[3-4]。近年来，在我国社会经济快速发展和全面启动“退耕还林还草”工程的背景下，流域水文循环过程发生了显著的变化[5]。以水而定、量水而行，现阶段人类活动对水资源的开发利用得到约束，尽可能抑制不合理用水需求[6]。在气候变化和人类活动共同影响下，流域水文演变和循环过程的内部规律和外在条件都有着相应的变化。众多研究表明在黄河流域人类活动是径流变化的主要驱动因素，黄河中上游窟野河流域、汾河流域和北洛河流域近年来人类活动对径流变化的贡献率均在70%以上[7-9]，洮河流域和清涧河流域人类活动对径流变化的贡献率相对较小但也均在50%以上[10-11]。

为厘清流域径流变化驱动因素，众多学者应用不同方法对其进行研究，应用较为广泛的有模型模拟和经验统计模型等[12]。目前，在模型模拟中SWAT模型在径流变化驱动因素的研究应用较多，如：吴小宏等[13]采用SWAT模型对泾河流域气候变化和土地利用变化及其对径流的影响进行了研究分析，结果表明人类活动是流域径流变化的主要因素；张洪波等[14]通过SWAT-MODFLOW耦合模型，

收稿日期：2021-05-07；　**修订日期**：2021-07-01

基金项目：国家重点研发计划（2018YFC1508105，2019YFC1510605）；国家自然科学基金（51909274，42001033）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2021JQ-237）；中国水科院五大人才计划（JZ0199A022021）资助

作者简介：刘宇（1996-），男，硕士研究生，主要从事水文学及水资源方向研究. E-mail: liuyu961030@163.com

通讯作者：田济扬（1989-），男，高级工程师，主要从事数据同化、陆气耦合及洪水预报工作. E-mail: tjyshd@126.com

对黄河中游延河流域径流变化进行了定量分析，结果表明下垫面变化的影响量约占人类活动影响总量的29.03%~65.79%；于成龙等[15]利用SWAT模型研究了西辽河流域水文演变的驱动因素，结果表明自然因素对湿地变化的影响大于人类活动。此外，在经验统计模型中考虑了水量和热量平衡的Budyko假设，目前也得到了广泛应用，如：孙福宝等[16]以黄河流域为研究对象，通过对其63个子流域水文气象资料的研究分析，证明了Budyko假设在黄河流域的适用性；杨汉波等[17-18]基于Budyko假设对黄河流域不同子流域的气候和下垫面变化对径流变化的贡献率进行了定量分析，结果表明Budyko假设对定量区分气候和下垫面变化对流域径流的影响具有广阔的应用前景；Zhang等[19]考虑到植被作用对黄土高原的11个子流域的径流变化归因进行了研究分析，并给出了不同植被类型的植物有效水系数。总的来说，模型模拟能够更准确模拟大气、地表、土壤中水的迁移转化过程，但其对方法的适用性和数据精度的要求较高，且计算相对复杂。而Budyko假设主要基于相关的物理理论定律和理论假设来分析流域水文过程机理，相比水文模型更为简便易行，因此本研究选用Budyko假设对流域径流变化的驱动因素进行研究。

泾河流域作为黄河的二级支流，位于生态环境脆弱、水土流失严重的黄土高原，流域水资源短缺，严重制约着区域社会经济发展[20]。尤其是进入21世纪以后，随着流域内人口的快速增长及农田灌溉面积的增加，流域径流大幅度减少[13]。如何加强人类活动对泾河流域水文变化的正向引导作用，实现人与自然和谐相处[21]，亟待对泾河流域水文演变规律及其变化归因进行研究。本研究以泾河流域为研究区域，从水-热-光等多个角度对泾河流域水文气象演变规律进行分析，并基于Budyko假设对流域水文变化驱动因素进行研究，定量评估气候变化及人类活动对流域水文变化的影响，以期为泾河流域水资源高效利用和科学配置提供合理有效的决策支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

泾河是渭河的最大支流，是黄河的二级支流，发源于宁夏回族自治区泾源县六盘山东麓，流域面积45421 km²，占渭河流域面积的33.70%，河道全长455.1 km，流经陕西、甘肃、宁夏3省，于陕西省西安市陈家滩注入渭河。流域属于温带大陆性气候，具有雨热同期、四季分明等特征。流域多年平均(1951—2019年)降水量为517.9 mm，年降水量最多达727.1 mm，最少仅为325.6 mm，年内分布主要集中在7—9月，占全年降水量的56.0%，11月—次年4月降水较少，仅占全年降水量的15.2%。此外，流域内丘陵和台地居多，河流水系较为发达。泾河流域位置、地形与水系如图1所示。

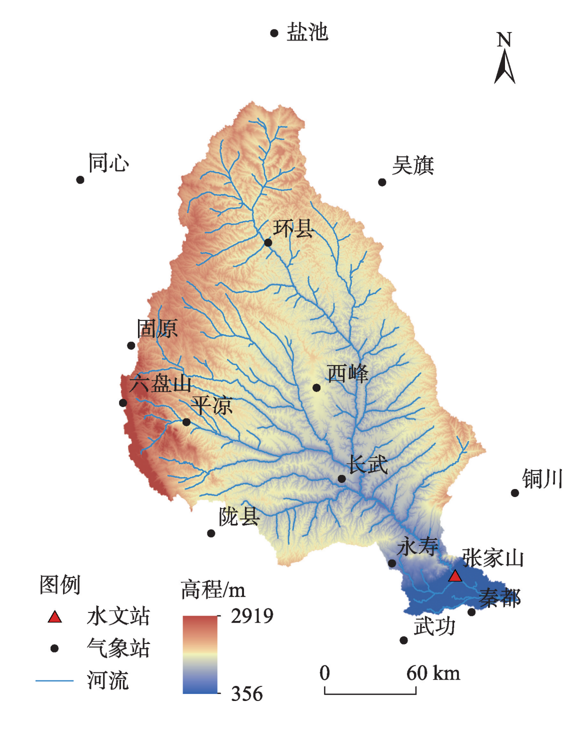


图1 泾河流域位置及水系图

Fig. 1 Location and drainage system map of Jinghe River Basin

1.2 数据资料

泾河流域内及周边14个国家气象站点1951—2019年日气象资料，来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)。张家山水文站1951—2018年的实测径流资料来源于水利部黄河水利委员会编印的《黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计》。数字高程模型(DEM)数据来自于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。多期土地利用数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

1.3 研究方法

本研究拟采用Penman-Monteith公式计算泾河

流域潜在蒸发量，线性回归法分析径流变化趋势，采用Mann-Kendall（M-K）检验和滑动t检验对流域年径流时间序列的突变进行分析，采用小波分析对流域年径流周期性进行分析，并基于Budyko假设理论对流域径流变化驱动因素进行研究。具体研究方法如下：

（1）Penman-Monteith公式

采用世界粮农组织（FAO）推荐的Penman-Monteith公式[22]，对各站点潜在蒸发量进行计算，公式如下：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}\mu_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34\mu_2)} \quad (1)$$

式中：ET_0为潜在蒸发量（$mm\cdot d^{-1}$）；R_n为净辐射（$MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$）；$G$为土壤通热量（$MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$），通常取0；$T$为日平均气温（℃）；$e_s$、$e_a$分别为饱和水汽压和实际水汽压（kPa）；$\Delta$、$\gamma$分别为饱和水汽压斜率和湿度表常数（$kPa\cdot ℃^{-1}$）；$\mu_2$为地面以上2 m处风速（$m\cdot s^{-1}$）。

（2）线性回归法

线性回归利用建立$y=ax+b$的一元线性回归方程来反映其线性变化趋势与倾向率。其中，a为斜率，若$a>0$，表示y随着x的增大而增大；若$a<0$，表示y随着x的增大而减小；若$a=0$，表示y随着x的增大整体趋势保持不变[23]。

（3）M-K检验

M-K主要通过构造秩序列（S_k）进行突变检验，计算公式如下[24]：

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j}^{i-1}\alpha_{ij} \quad (k=2,3,\cdots,n) \quad (2)$$

式中：k为小于等于n且不等于j的变量；α_{ij}为统计量，计算公式如下：

$$\alpha_{ij}=\begin{cases}0 & (X_i\leqslant X_j,\ 且1\leqslant j\leqslant i)\\ 1 & (X_i>X_j,\ 且1\leqslant j\leqslant i)\end{cases} \quad (3)$$

另外，通过S_k可计算得到UF_k，计算公式如下：

$$UF_k=\frac{[S_k-E(S_k)]}{\sqrt{V_{AR}(S_k)}} \quad (k=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

式中：当$k=1$时$UF_1=0$；$E(S_k)$、$V_{AR}(S_k)$分别为样本均值和方差，计算公式如下：

$$\begin{cases}E(S_k)=\frac{k(k+1)}{4}\\ V_{AR}(S_k)=\frac{k(k-1)(2k+5)}{72}\end{cases} \quad (5)$$

若$|UF_k|>U_{\alpha/2}$，则将水文时间序列反向排列，再次依照公式（2~5）计算UB_k。

（4）滑动t检验

滑动t检验可用于分析水文时间序列的突变性，计算公式如下[25]：

$$t=\frac{\overline{x_1}-\overline{x_2}}{s\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

式中：$\overline{x_1}$、$\overline{x_2}$为前后2个样本平均值；n_1、n_2为样本x_1、x_2个数；s为统计量，计算公式如下：

$$s=\sqrt{\frac{n_1s_1^2+n_2s_2^2}{n_1+n_2-2}} \quad (7)$$

式中：s_1^2、s_2^2分别为样本x_1、x_2的方差。

（5）小波分析

小波函数是指具有震荡性且能够迅速衰减到零的函数，即$\psi(t)\in L^2(R)$且满足公式（8）[26]：

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)dt=0 \quad (8)$$

鉴于水文时间序列的特征，选用Morlet小波函数，计算公式如下：

$$\psi(t)=e^{\varepsilon}e^{\frac{-t^2}{2}} \quad (9)$$

式中：ε为常数；t为时间。

（6）基于Budyko假设定量识别径流变化

Milly等[27]基于Budyko假设理论，提出了气候变化导致径流变化的计算公式，见公式（10~12）：

$$Q_c=\alpha\Delta P+\beta\Delta ET_0 \quad (10)$$

$$\alpha=1-f(\phi)+\phi f'(\phi) \quad (11)$$

$$\beta=-f'(\phi) \quad (12)$$

式中：Q_c为气候变化导致径流的变化量（mm）；ΔP为降水量变化量（mm）；ΔET_0为潜在蒸发量的变化量（mm）；α和β分别为降水量和潜在蒸发量每变化一个单位时的径流变化量；ϕ为潜在蒸发量与降水量的比值。

在$f(\phi)$的各种表达式中，Zhang等[19]考虑到植被作用提出的Budyko假设解析式，计算公式如下：

$$\frac{ET_a}{P}=\frac{1+\omega\frac{ET_0}{P}}{1+\omega\frac{ET_0}{P}+\left(\frac{ET_0}{P}\right)^{-1}}=f(\phi)=\frac{1+\omega\phi}{1+\omega\phi+\phi^{-1}} \quad (13)$$

式中：ET_a为实际蒸发量(mm)；P为降水量(mm)；ω为植被水分利用系数，主要用于反映不同植被以不同

方式吸收土壤中的水分,其值域为[0.1, 0.22],Zhang等[19]给出一般情况下的ω建议值,禾本科植物(包括土壤蒸发)为0.5,森林植被为2.0。

结合Zhang等[19]的Budyko假设解析式,可将α和β的计算公式分别化简为:

$$\alpha=\frac{1+2\phi+3\omega\phi^2}{\left(1+\phi+\omega\phi^2\right)^2} \tag{14}$$

$$\beta=\frac{1+2\omega\phi}{\left(1+\phi+\omega\phi^2\right)^2} \tag{15}$$

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

本研究以泾河流域1951—2019年的气象资料为基础,采用线性回归法对流域各气象要素的变化趋势进行计算分析。由图2可知,泾河流域各气象要素中降水量、潜在蒸发量、最高气温、最低气温和平均气温均有增高的趋势,增高速率分别为0.127 mm·a^{-1}、0.20 mm·a^{-1}、0.032 ℃·a^{-1}、0.027 ℃·a^{-1}、0.028 ℃·a^{-1};日照时长、相对湿度和风速有减小的趋势,减少速率分别为0.002 h·a^{-1}、0.054 %·a^{-1}、0.006 m·s^{-1}·a^{-1}。

2.2 径流变化特征

泾河流域1951—2018年不同时期径流深年际变化特征,如图3所示。流域年径流深以0.41 mm·a^{-1}的速率减少,其中汛期径流深以0.27 mm·a^{-1}的速率减少,约为非汛期的2倍。此外,流域年径流深、汛期径流深、非汛期径流深的最大值分别出现在1964年(90.44 mm)、1964年(62.23 mm)、1963年(29.38 mm),最小值分别出现在2015年(14.62 mm)、2015年(5.44 mm)、2018年(5.83 mm),变差系数分别为0.46、0.57、0.39,表明汛期径流深年际波动程度更大。

利用M-K突变检验、滑动t检验对泾河流域张家山水文站的径流时间序列进行突变分析,如图4所示。M-K突变检验表明,泾河流域张家山水文站的径流在1996年发生突变;依据步长为5的滑动t检验,在99%置信区间内,可认为张家山水文站的

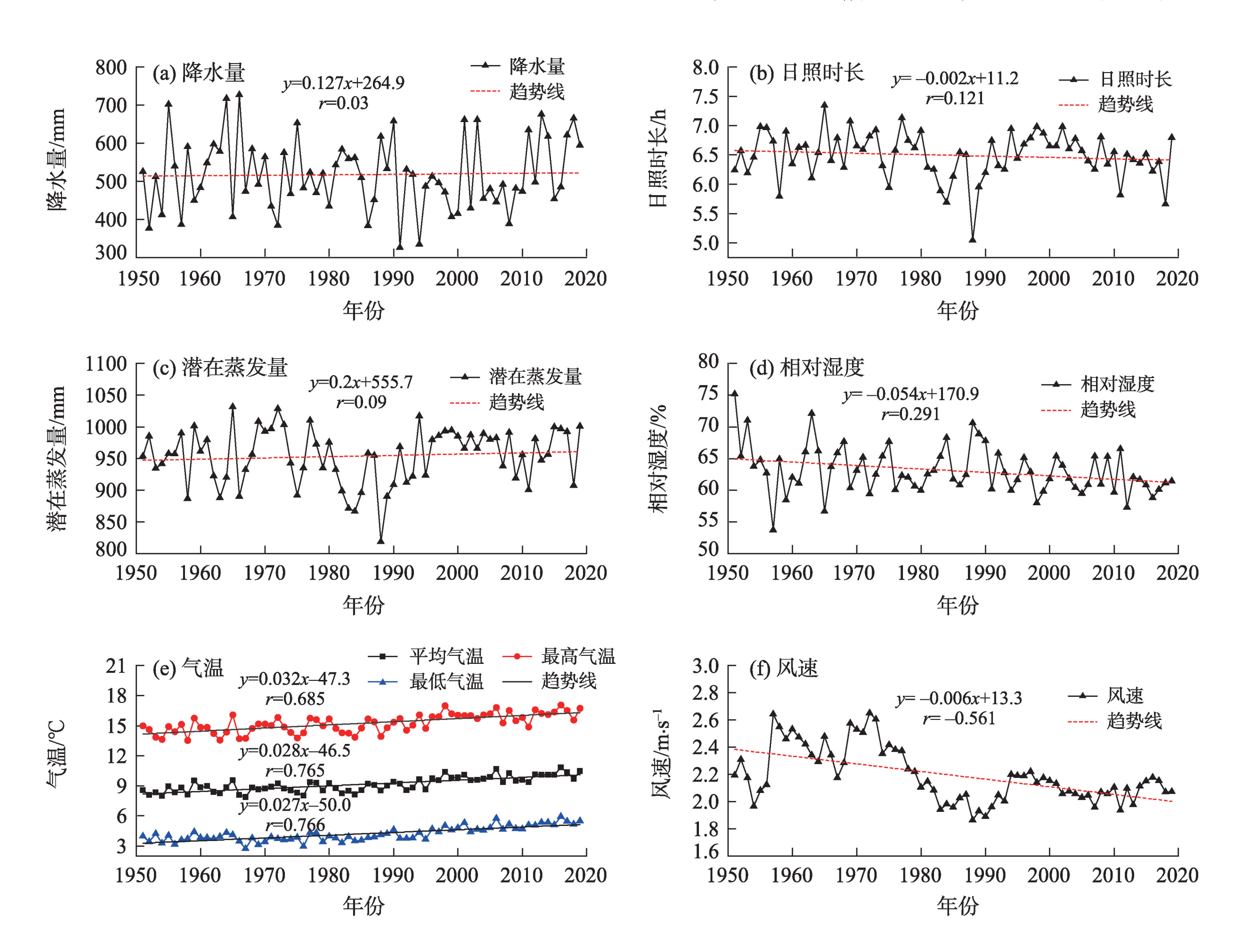


图2 1591—2019年泾河流域气象要素年际变化

Fig. 2 Interannual variations of meteorological elements in Jinghe River Basin from 1591 to 2019

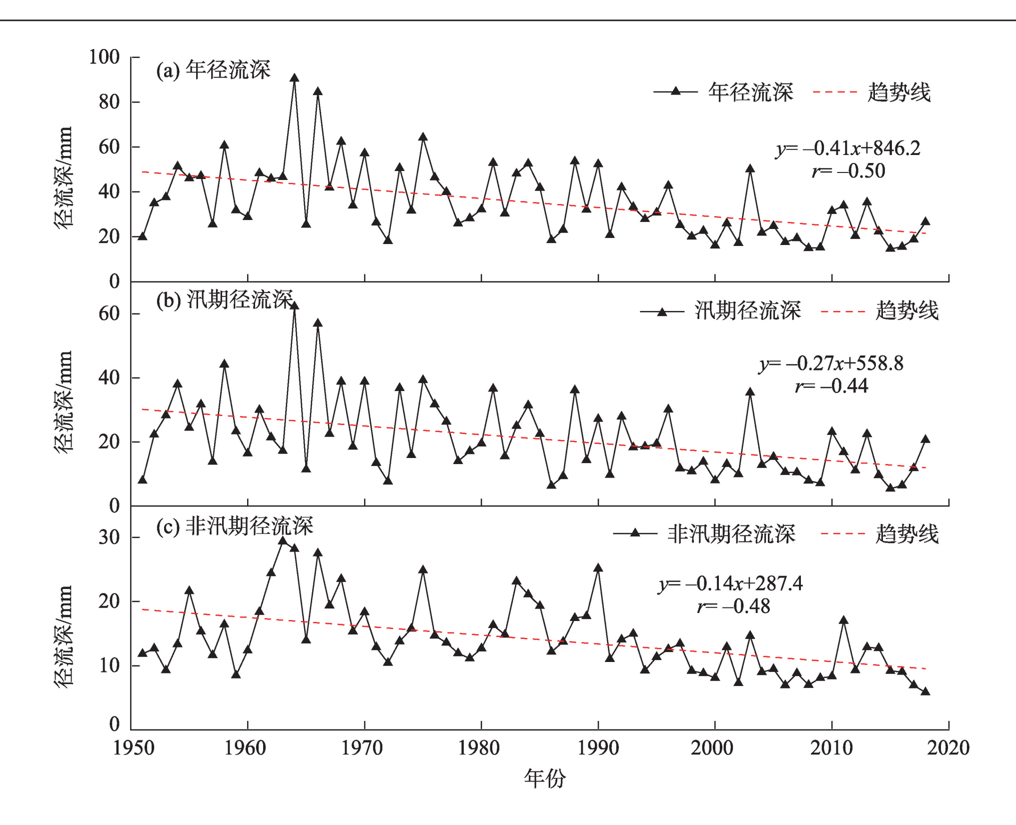


图3 1951—2018年泾河流域径流变化趋势

Fig. 3 Change trend of runoff in Jinghe River Basin from 1951 to 2018

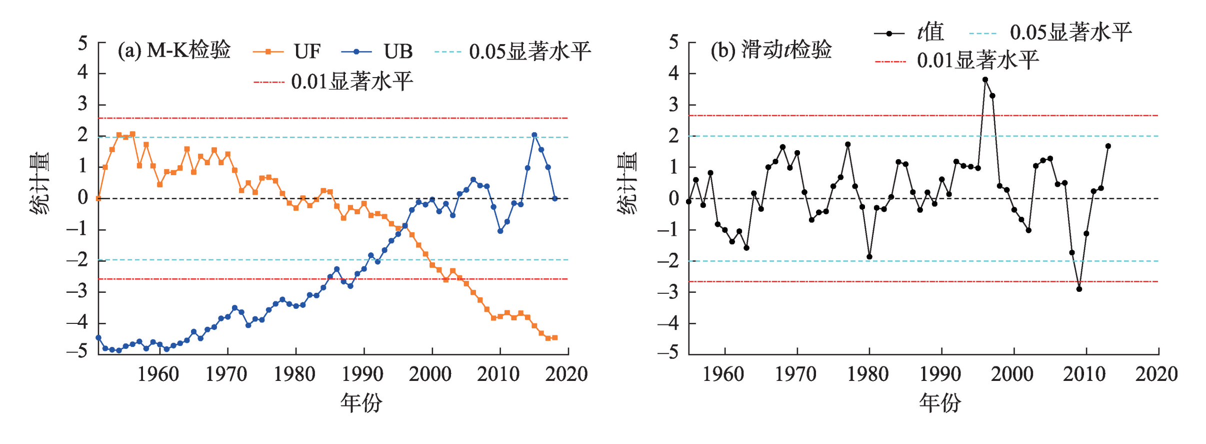


图4 泾河流域年径流突变检验

Fig. 4 Test of abrupt change of annual runoff in Jinghe River Basin

径流发生突变的年份为1996、1997、2009年。综合考虑两种方法突变检验结果，认为泾河流域径流在1996年发生显著减少的突变。

泾河流域1996年前后水文气候要素统计特征值，如表1所示。由表可知，径流深在突变后相较于突变前减少43.49%；气象要素中仅相对湿度和风速在突变后的平均值低于突变前，分别减少了3.59%、6.96%；降水量、潜在蒸发量、日照时长、最高气温、最低气温和平均气温分别增加了0.60%、2.45%、0.38%、8.91%、31.83%和13.62%。另外，水文气象要素突变后的变差系数均低于突变前，说明突变后的水文气象要素变异性较小。

小波系数实部和方差图能够反映流域水文要素变化的周期特征（图5），泾河流域年径流存在10~20 a的短周期和30~60 a的长周期的丰枯变化特征（图5a）。流域年径流主要存在3个主周期，第一、第二和第三主周期分别为41 a、58 a和15 a特征时间尺度（图5b）。

2.3 径流变化驱动因素研究

泾河流域各时期各类型土地利用面积，如图6

表1　泾河流域突变前后水文气候要素统计特征值

Tab. 1　Statistical characteristic values of hydrological and climatic elements before and after the abrupt change in Jinghe River Basin

水文气象要素	突变前(1951—1996年)		突变后(1997—2018年)	
	均值	变差系数	均值	变差系数
年径流深/mm	41.00	0.38	23.17	0.36
降水量/mm	515.17	0.18	518.81	0.18
平均气温/℃	8.74	0.05	9.93	0.04
最高气温/℃	14.79	0.05	16.11	0.03
最低气温/℃	3.50	0.11	5.00	0.08
日照时长/h	6.48	0.07	6.51	0.05
相对湿度/%	63.85	0.06	61.56	0.04
风速/$m \cdot s^{-1}$	2.24	0.10	2.09	0.03
潜在蒸发量/mm	945.81	0.05	968.95	0.03

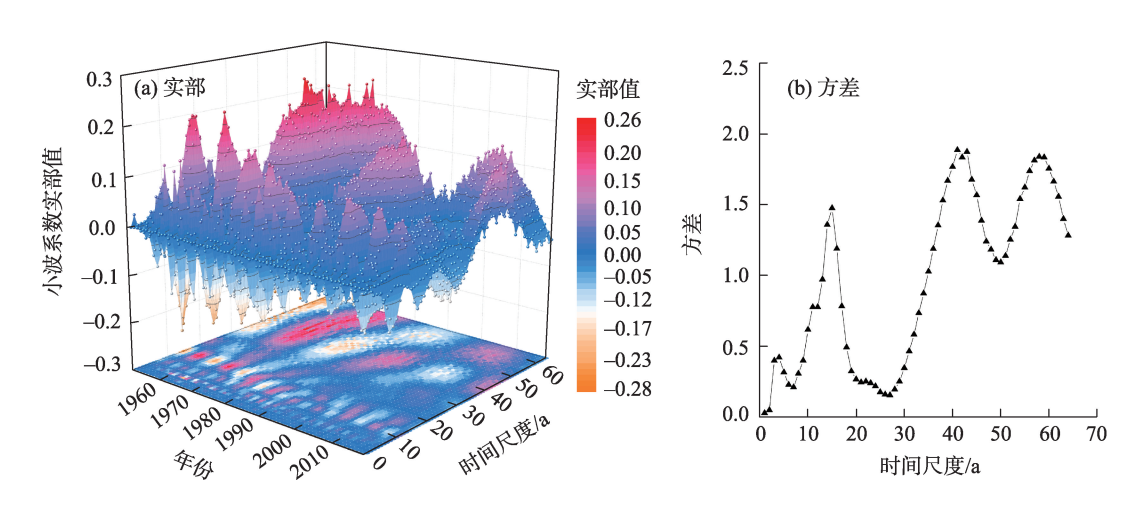


图5　泾河流域年径流小波系数实部和方差

Fig. 5　Real part and variance of annual runoff wavelet coefficients in Jinghe River Basin

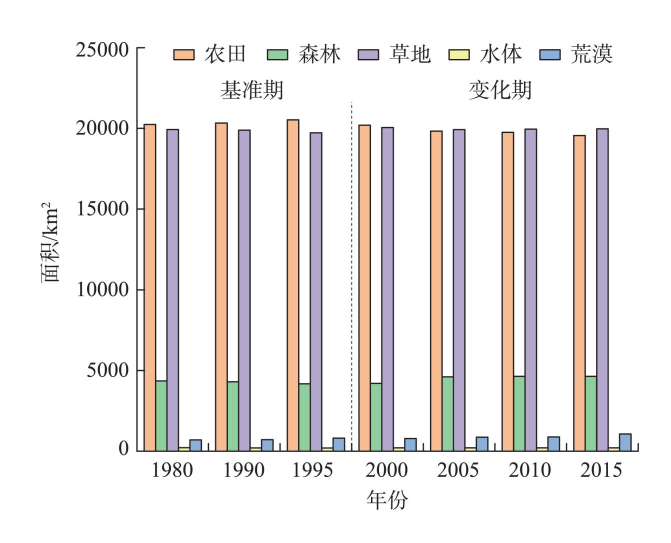


图6　泾河流域各时期土地覆被面积

Fig. 6　Area of land cover in Jinghe River Basin in different periods

所示。基准期(1980、1990、1995年)流域农田、草地、森林、荒漠和水体面积的平均值,分别为20370 km^2、19848 km^2、4277 km^2、743 km^2、206 km^2,相较于变化期(2000、2005、2010、2015年)农田面积减少了535 km^2,森林和草地面积分别增加244 km^2和126 km^2。

依据Zhang等[19]给出的不同植被水分利用系数建议值,结合泾河流域不同土地利用面积对流域植被水分利用系数进行求解,得到流域基准期、变化期和总时期的植被水分利用系数分别为0.643、0.647和0.646。植被水分利用系数的增大主要是由于禾本科植物向森林植被转化引起,其中,森林面积增加了244 km^2,提高了流域植被水分利用系数。

依据不同时期植被水分利用系数,计算得到泾河流域水文气象参数特征值(表2)。泾河流域由基

表2 泾河流域水文气象参数特征值

Tab. 2 Characteristic values of hydrometeorological parameters in Jinghe River Basin

时期	时段	P/mm	ET_0/mm	R/mm	α	β
基准期(1951—1996年)	年	516	946	41	0.448	−0.135
	汛期	330	383	25	0.647	−0.272
	非汛期	186	563	16	0.253	−0.050
变化期(1997—2018年)	年	519	969	23	0.439	−0.130
	汛期	331	375	13	0.656	−0.281
	非汛期	188	594	10	0.237	−0.045
总时期(1951—2018年)	年	517	953	35	0.445	−0.133
	汛期	330	380	21	0.650	−0.275
	非汛期	187	573	14	0.248	−0.048

注：P为降水量，ET_0为潜在蒸发量，R为径流深，α为降水量每变化一个单位径流变化量，β为潜在蒸发量每变化一个单位径流变化量。

准期到变化期，降水量均增加，径流量均减小，潜在蒸发量除汛期外均增加。在不同时期汛期相较于年和非汛期径流变化对降水量和潜在蒸发量变化均较为敏感，其中在变化期敏感程度最高，即流域汛期每增加1 mm降水量(或潜在蒸发量)将引起流域径流变化量为0.656 mm(或−0.281 mm)。此外，流域径流变化对降水量的敏感程度是潜在蒸发量的2.3~5.3倍。

由表3可知，突变后泾河流域多年平均年径流深减少17.83 mm，其中汛期减少量占63.66%，为非汛期的1.75倍；年降水量和年潜在蒸发量分别增加3.10 mm和23.14 mm，均主要来源于非汛期，分别占70%和136%。依据Milly-Zhang公式，人类活动和气候变化导致突变后流域：多年平均年径流深分别减少16.13 mm、1.71 mm，贡献率分别为90.43%、9.57%；汛期径流深分别减少7.65 mm、4.35 mm，贡献率分别为63.75%、36.25%；非汛期径流深分别减少5.64 mm、0.36 mm，贡献率分别为94.08%、5.92%。其中，降水量对年、汛期、非汛期径流变化的贡献率分别为−7.72%、−16.76%、−12.78%，潜在蒸发量对年、汛期、非汛期径流变化的贡献率分别为17.29%、53.01%、18.70%。

3 讨 论

目前，针对黄河流域径流变化驱动因素的众多研究表明：人类活动是引起黄河流域径流变化的主要影响因素[7-11]，人类活动通过改变下垫面条件进而影响流域水循环过程，其对流域径流变化的影响因素众多，如土地利用变化、水资源开发、水利工程等均有明显的影响[27]。由于缺少相关的基础资料，本研究在评估气候变化和人类活动对泾河流域径流变化的贡献率时，将降水量和蒸发量作为影响径流变化的气候因素，其他因素归结为人类活动，这可能导致研究结果与实际结果存在一定的偏差。因此，在今后的工作中还需针对不同驱动因素对泾河流域径流变化的影响进一步研究。

泾河流域位于水土流失严重且生态脆弱的黄土高原，其径流变化相较于其他黄河流域的子流域更易受到人类活动的影响。本研究表明，人类活动对泾河流域径流变化的影响程度远高于气候变化，

表3 泾河流域径流变化归因

Tab. 3 Attribution of runoff change in Jinghe River Basin

时间	变化量/mm			影响量/mm				贡献率/%			
	ΔR	ΔP	ΔET_0	R_p	R_e	R_c	R_h	C_p	C_e	C_c	C_h
年	−17.83	3.10	23.14	1.38	−3.08	−1.71	−16.13	−7.72	17.29	9.57	90.43
汛期	−11.35	0.84	−8.40	2.01	−6.36	−4.35	−7.65	−16.76	53.01	36.25	63.75
非汛期	−6.48	2.17	31.54	0.77	−1.12	−0.36	−5.64	−12.78	18.70	5.92	94.08

注：ΔR、ΔP、ΔET_0分别为径流深、降水量、潜在蒸发量的变化量，R_p、R_e、R_c、R_h分别为降水量、潜在蒸发量、气候和人类活动变化引起的径流变化量，C_p、C_e、C_c、C_h分别为降水量、潜在蒸发量、气候和人类活动变化对径流变化的贡献率。

该结果与吴小宏等[13]采用SWAT模型对该流域径流变化的研究结果一致,但本研究时间序列较长,因此人类活动对径流变化的贡献率略大于其研究结果。此外,人类活动对年、汛期、非汛期径流变化的贡献率分别为90.43%、63.75%、94.08%,而其对汛期径流变化的影响又远小于非汛期。这一结论与Wang等[28]基于Budyko假设对黄河流域径流变化,人类活动起主要作用,影响最大的是非汛期的平均流量,其次是年最大流量的研究结果一致。不同时期人类活动对径流变化贡献的差异,主要与泾河流域内水利设施兴建和农田灌溉有关。据统计流域内灌区众多,仅在1990年之前建成的万亩以上灌区就有27处,农业灌溉用水占流域多年平均径流量的31.37%[29-30]。此外,流域内大多数大型水库为年调节水库,为保证流域内的农业灌溉用水量,其主要有"削峰补枯"的作用。因此,在非汛期时,人类活动对径流变化的影响更大。此外,泾河流域径流变化对降水量的敏感程度是潜在蒸发量的2.3~5.3倍,表明流域径流时空变化过程与降水变化较为敏感,这与大多数研究较为一致[7-9]。但由于泾河流域径流突变前后降水变化量较小,其中汛期降水变化量为0.84 mm,仅为潜在蒸发变化量的十分之一,因此降水变化对径流变化的贡献率相对较小。

4 结 论

本研究以泾河流域为研究区域,对流域水文气象演变规律进行分析,并对径流变化过程中气候变化和人类活动的贡献率进行定量分析,主要结论如下:

(1) 近70 a来,流域年径流深以0.41 $mm \cdot a^{-1}$的速率减少,其中汛期径流深的减少速率约为非汛期的2倍。各气象因素中降水量、潜在蒸发量和气温呈增高趋势,日照时长、相对湿度和风速呈减少趋势。

(2) 流域年径流深在1996年发生显著减少突变,突变后减少了43.49%,其中汛期减少量占63.66%,为非汛期的1.75倍。流域年径流深存在10~20 a的短周期和30~60 a的长周期的丰枯变化特征,第一、第二和第三主周期分别为41 a、58 a和15 a特征时间尺度。

(3) 人类活动是流域径流变化的主要影响因素,对年、汛期、非汛期的影响量分别为16.13 mm、7.65 mm、5.64 mm,贡献率分别为90.43%、63.75%、94.08%。气候变化对径流变化的影响主要是由潜在蒸发量变化主导,潜在蒸发量对年、汛期、非汛期径流变化的贡献率分别为17.29%、53.01%、18.70%。

参考文献(References)

[1] 程鹏, 孔祥伟, 罗汉, 等. 近60 a以来祁连山中部气候变化及其径流响应研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1192-1201. [Cheng Peng, Kong Xiangwei, Luo Han, et al. Climate change and its runoff response in the middle section of the Qilian Mountains in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1192-1201.]

[2] Hu J Y, Wu Y P, Wang L J, et al. Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593(2): 125741, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125741.

[3] 於琍, 朴世龙. IPCC第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 33-36. [Yu Li, Piao Shilong. Key scientific points on carbon and other biogeochemical cycles from the IPCC fifth assessment report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 33-36.]

[4] 邹骥, 滕飞, 傅莎. 减缓气候变化社会经济评价研究的最新进展——对IPCC第五次评估报告第三工作组报告的评述[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(5): 313-322. [Zou Ji, Teng Fei, Fu Sha. The latest progress in socioeconomic assessment of the mitigation of climate change: Review of the IPCC fifth assessment WGIII report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(5): 313-322.]

[5] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6597-6612. [Deng Yuanjie, Hou Mengyang, Xie Yifan, et al. Impact of the grain for green project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6597-6612.]

[6] 刘万华. 发挥水利支撑保障作用推动黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 中国水利, 2020(19): 7-8. [Liu Wanhua. Play the role of water conservancy support and guarantee, and push ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. China Water Resources, 2020(19): 7-8.]

[7] 白乐, 李怀恩, 何宏谋. 窟野河径流变化检测及归因研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 15-22. [Bai Le, Li Huaien, He Hongmou. Analysis on detection and attribution of runoff change in Kuye River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(2): 15-22.]

[8] 张凯, 鲁克新, 李鹏, 等. 近60年汾河中上游水沙变化趋势及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 54-59. [Zhang Kai, Lu Kexin, Li Peng, et al. Trend of runoff and sediment change and its driving factors in the middle and upper reaches of Fenhe River in

the past 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 54−59.]

[9] 陈玫君, 穆兴民, 高鹏, 等. 北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 1−8. [Chen Meijun, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Characteristics and driving factors of runoff changes in the upper reach of the Beiluo River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 1−8.]

[10] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 87−92, 100. [Liu Zhuoxi, Chen Xin, Guan Xiaoxiang, et al. Attribution of runoff change in the Taohe River Basin under a changing environment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 87−92, 100.]

[11] 王计平, 赵梅, 程复, 等. 清涧河流域近50年径流时间变化特征及趋势分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 54−59. [Wang Jiping, Zhao Mei, Chen Fu, et al. Temporal variations and trend analysis of runoff in Qingjianhe River in Yellow River midstream area in the past 50 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 54−59.]

[12] Liu D D. A rational performance criterion for hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590(3): 125488, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125488.

[13] 吴小宏, 刘招, 李强, 等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144−149. [Wu Xiaohong, Liu Zhao, Li Qiang, et al. Attribution analysis of long series runoff and sediment variation in Jinghe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 144−149.]

[14] 张洪波, 支童, 卫星辰, 等. 基于SWAT−MODFLOW的黄河中游区径流过程模拟及对黄土高原变绿的响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 1−10. [Zhang Hongbo, Zhi Tong, Wei Xingchen, et al. Simulation of runoff process in the middle reaches of the Yellow River based on SWAT-MODFLOW model and its response to the greening of the Loess Plateau[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 1−10.]

[15] 于成龙, 王志春, 刘丹, 等. 基于SWAT模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 286−297. [Yu Chenglong, Wang Zhichun, Liu Dan, et al. Evolution process and driving force analysis of natural wetlands in Xiliao River Basin based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 286−297.]

[16] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于Budyko假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(4): 409−416. [Sun Fubao, Yang Dawen, Liu Zhiyu, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River Basin based on Budyko hypothesis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 409−416.]

[17] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 等. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 610−617. [Yang Hanbo, Yang Dawen, Lei Zhidong, et al. Derivation and validation of watershed coupled water-energy balance equation at arbitrary time scale[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (5): 610−617.]

[18] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024−1034. [Yang Dawen, Zhang Shulei, Xu Xiangyu. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1024−1034.]

[19] Zhang L, Potter N, Hickel K, et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-model development and testing[J]. Journal of Hydrology, 2008, 360(1/4): 117−131.

[20] 李强, 刘招, 李璐璐, 等. 泾河水沙多年变化规律及驱动因素研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 34−37, 29. [Li Qiang, Liu Zhao, Li Lulu, et al. Study on change law and driving factors of runoff and sediment in Jinghe River[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(3): 34−37, 29.]

[21] 李佩成. 追求人与自然和谐相处是历史发展的必然[J]. 科技导报, 2014, 32(30): 1. [Li Peicheng. The pursuit of harmonious coexistence between man and nature is the inevitable of historical development[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(30): 1.]

[22] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 近59 a锡林河流域潜在蒸散发及地表干湿状况变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 997−1003. [Zhang Lu, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Trends of potential evapotranspiration and surface wet conditions in the Xilin River Basin in recent 59 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 997−1003.]

[23] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557−567. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Ma Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 557−567.]

[24] 刘宇, 李雯晴, 刘招, 等. 基于SPEI渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 109−117. [Liu Yu, Li Wenqing, Liu Zhao, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of the drought in Weibei Loess Tableland Area based on SPEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 109−117.]

[25] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220−1230. [Jiao Wenhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220−1230.]

[26] 刘濛濛, 隆永兰. 巴音布鲁克近58 a气候变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 715−723. [Liu Mengmeng, Long Yonglan. Climatic variation characteristics in Bayinbuluk during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 715−723.]

[27] 王贺年, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 气候变化与人类活动对海河山区

流域径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(1): 102−108. [Wang Henian, Zhang Manyin, Cui Lijuan, et al. Effects of climate change and human activities on streamflow in Haihe mountainous area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(1): 102−108.]

[28] Wang W, Zhang Y Y, Tang Q H. Impact assessment of climate change and human activities on streamflow signatures in the Yellow River Basin using the Budyko hypothesis and derived differential equation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591(7401): 125460, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125460.

[29] 李强. 泾河多年水沙演变规律及其对中下游灌区影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2019. [Li Qiang. Law of change about runoff and sediment in the Jinghe River and effects of change on the Jing-Huiqu irrigation area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.]

[30] 刘景纯. 20世纪30年代陕西新兴农田水利的系统建设与灌区新经济体构建[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2020, 49(6): 152−161. [Liu Jingchun. The construction of the water conservancy construction of farmland and ideal of a new economy in the irrigation region of Shaanxi Province in the 1930s[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2020, 49(6): 152−161.]

Runoff change and its driving factors in Jinghe River Basin in recent 70 years

LIU Yu[1,2,3,4], GUAN Zilong[2,3,4], TIAN Jiyang[1], LIU Ronghua[1], GUAN Ronghao[5]

(1. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Quantitative evaluation and attribution identification of runoff change characteristics are the basis for the rational development and utilization of water resources in response to climate change. This study examines the hydrological and meteorological element change characteristics of the Jinghe River Basin in China over the last 70 years, using the M-K test, sliding *t*-test, wavelet analysis, and other methods to assess the contribution of climate change and human activities to runoff changes based on Budyko assumptions. The results show that: (1) The annual runoff depth of the Jinghe River Basin decreased at a rate of 0.41 mm·a^{-1}, and the abrupt change occurred in 1996, which decreased by 43.49% compared with that before the abrupt change. (2) The characteristic time scales for the first, second, and third main periods of annual runoff depth were 41 a, 58 a, and 15 a, respectively. (3) During flood season, runoff variation is sensitive to both precipitation and potential evapotranspiration, with precipitation sensitivity ranging from 2.3 to 5.3 times that of potential evapotranspiration. (4) Human activities are the main influencing factor of runoff variation in the basin, contributing 90.43%, 63.75%, and 94.08% to annual, flood season, and nonflood season runoff variation, respectively. The findings of the study can serve as a scientific foundation for the comprehensive management and scientific deployment of regional water resources and serve as a guide for the control of soil erosion in the Loess Plateau.

Key words: runoff changes; human activity; climate change; Budyko assumptions; Jinghe River Basin